مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (٨) العدد(١) ٢٠٢٤
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (8) No. (1) 2024

# استخدام نماذج ماركوف منتهية الحالة لاختيار مخطّطات التّعديل والتّرميز لتحقيق أفضل استغلال للطّيف

رهف ابراهيم ابراهيم *

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٣/٩/٢٦ . قُبِل للنشر في ٢٠٢٤/١/١١ )

□ ملخّص□

أدت الحاجة لمعدلات عالية لنقل البيانات اللاسلكية إلى ابتكار تقنيات عديدة، وذلك لتلبية حاجات مستخدمي الشبكات اللاسلكية الذي ازداد عددهم بشكل كبير في العقد الأخير. تهدف الدّراسة إلى استغلال موارد الشبكة اللاسلكية بشكل أمثل وذلك بتحسين استغلال الطيف المتاح بشكل فعّال عند الارسال، وذلك باستخدام تقنيات التّعديل والتّرميز التكيفي (AMC). بالاعتماد على نموذج ماركوف ذو الحالة المنتهية (FSMC) للاختيار بين مخطّطات التّعديل، ومعدّل التّرميز المناسب من أجل تحقيق التوازن بين فعاليّة الطّيف، ومعدل خطأ البت، وذلك حسب نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR المقدّرة في المستقبل، والتي يحصل عليها المرسل كتغذية عكسية (feedback)، كما تم استخدام ترميز فحص التّكافؤ منخفض الكثافة (LDPC) لتقليل عدد البتّات الخاطئة وزيادة موثوقية الارسال.

تمت المحاكاة باستخدام البيئة البرمجية MATLAB R2019a لتوليد الإشارة وتحليل النتائج المستنبطة من الدراسة.

**الكلمات المفتاحية:** سلاسل ماركوف ، فعاليّة الطيف، معدل خطأ البت (BER)، نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR)، التّعديل، ترميز LDPC.

* مهندسة حاصلة على درجة الماجستير في هندسة الاتصالات من كليّة هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات – جامعة طرطوس – سوريا.

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (٨) العدد(١) ٢٠٢٤
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (8) No. (1) 2024

# Using finite-state Markov models to choose modulation and coding schemes to achieve the best spectrum utilization

**Rahaf Ibraheem Ibraheem***

**(Received 26/9/2023 . Accepted 11/1/2024)**

**□ ABSTRACT □**

The need for high rates of wireless data transmission has led to the innovation of many technologies, in order to meet the needs of wireless network users, whose number has increased significantly in the last decade. The study aims to optimize the use of wireless network resources by effectively improving the use of the available spectrum when transmitting, using adaptive modulation and coding (AMC) techniques. Relying on the Finite State Markov Model (FSMC) to choose between the modulation schemes and the appropriate coding rate in order to achieve a balance between spectrum efficiency and bit error rate, according to the estimated signal-to-noise ratio (SNR) in the receiver, which the sender receives as feedback. Low-density parity check coding (LDPC) was also used to reduce the number of false bits and increase transmission reliability.

The simulation was completed using the MATLAB R2019a software environment in order to generate the signal and analyze the results derived from the study.

**Keywords:** Markov Chains, Spectrum Efficiency, Bit Error Rate (BER), Signal-to-Noise Ratio (SNR), Modulation, LDPC coding.

*A n engineer with a master's degree in communications engineering from the Faculty of Information and Communications Technology Engineering - University of Tartous - Syria.

## 1. مقدمة:

أدّت الزّيادة الكبيرة في عدد مستخدمي الشّبكات اللاسلكيّة، وما رافقها من تصاعد الطّلب على معدّلات نقل بيانات عالية لتلبية احتياجاتهم في استخدام التّطبيقات الحديثة من اتّصالات مرئية، وتصفّح انترنت عالي السرعة... وهذا ما شكّل تحدّياً كبيراً لمهندسي الاتّصالات، فسعوا لتحسين وابتكار معايير جديدة بمعدّلات نقل بيانات أكبر وعرض حزمة أكبر [1]. فظهر الجيل الرّابع تلاه الجيل الخامس ولاتزال الأبحاث جارية لزيادة معدّلات النّقل وعرض الحزمة الترّددية (Bandwidth) المتاح، لكن زيادة الحزمة مكلف حيث يحتاج إلى وجود تجهيزات فيزيائية من هوائيّات ومرشّحات ... حيث تعمل هذه التّجهيزات في عرض حزمة محدد.

تتعرض الإشارة المرسلة في طريقها للعديد من العوائق التي تسبب خفوتها، نتيجة تأثير المسارات المتعددة، أو التظليل Shadowing، وهذا ما يجعل جودة الإشارة متغيرة بشكل دائم، فظهرت الحاجة إلى استخدام تقنيات ديناميكية للتغلّب على هذه المشكلة، وأهمها هي تقنية التّعديل والتّرميز التكيّفي (AMC) Adaptive Modulation and Coding [2]. تعتمد تقنية AMC بشكل أساسي على تقدير معلومات حالة القناة (CSI) Channel State Information التي تتم في المستقبل، ويتم إعادة ارسالها كتغذية عكسيّة feedback إلى المرسل، وبهذا يتم تكييف الوصلة من خلال ضبط بارامترات الإرسال على جودة الوصلة اللحظية.

(على سبيل المثال يستخدم مخطّط تعديل (64-QAM) مع ترميز منخفض عندما تكون القناة خالية من الضجيج، بينما في القناة الأكثر ضجيجاً، يختار النّظام مخطّط تعديل أكثر قوة (QPSK)، ومعدّل ترميز أعلى للحفاظ على جودة الاتصال واستقرار الوصلة دون زيادة استطاعة الإشارة [2,3]). وبهذه الطريقة، يمكن استخدام مخطّط التّعديل والتّرميز الأكثر ملاءمة لتحسين أداء الشّبكة [4]. فتتيح للآليات التكيّفية الاستخدام الفعّال لعرض الحزمة المتاح، وبالتّالي تحسين الفعاليّة الطّيفية (SE)، مع توفير معدّل خطأ بت Bit Error Rate (BER) مستهدف عند المستقبل، بالنتيجة زيادة موثوقية الوصلة link reliability.

يعد عدم اليقين بشأن الحصول على CSI دقيقة أحد القيود الرئيسية في الأنظمة التكيّفية، وهذا كان الدافع وراء بحثنا هذا والعمل على تحسين الفعاليّة الطّيفية بالاستخدام المناسب AMC. يهدف البحث إلى اقتراح نماذج سلاسل ماركوف ذات الحالة المنتهية FSMC للتنبؤ بحالة القناة، وذلك لتخفيف تأثير CSI القديمة (غير المحدثة).

**الدراسات المرجعية:**

- عمل الباحثون في [5] على دراسة تأثير أخطاء تقدير حالة القناة في نظام يستخدم AMC والتّرميزات المتعددة. وتم استخدام مرشح ماركوف المخفي Hidden Markov Model (HMM) للتخفيف من آثار أخطاء التقدير حيث استطاع التقليل من خطأ تقدير الحالة بشكل جيّد، وتحسن إنتاجيّة النّظام.
- تم حساب حدود معدّل خطأ البت (BER) لـ M-QAM في [6] بشكل أكثر دقّة مما هو مستخدم سابقاً في الدّراسات. يتيح ذلك إجراء تحليل أكثر شمولاً لتكييف الاستطاعة مع ظروف الخفوت لتحسين الفعاليّة الطّيفية. من خلال مراعاة تأثير ربح ترميز الخطأ على تكيف الاستطاعة، اقتراح نموذج FSMC من 7 حالات لتنفيذ مخطّط التّعديل والتّرميز، ولكن لم يأخذ حالات التّرميز التكراري بعين الاعتبار في حسابات النّموذج الرياضي.

- يقترح [7] نموذج قناة ماركوف ذات الحالة المحدودة من 10 حالات (FSMC) لتنفيذ مخطّط التّعديل والتّرميز التكيّفيين (AMC) لتعظيم كفاءتها الطّيفية في بيئة خفوت رايلي وقارنوها مع نموذج مكوّن من 7 حالات. وتمكنوا من الوصول إلى فعاليّة طيف تقدر بـ 5 bit/s/Hz وكون ترميز (RS-CC) ذو قدرة كبيرة على تصحيح الخطأ، ورغم وضع أساس لحساب قيود الاستطاعة لكن لم يتم التّطرق إليها أو حسابها في المحاكاة.
- عالج [8] في بحثه التّعديل التكيّفي لنظام الوصلة اللاسلكية من نهاية إلى نهاية باستخدام مخطّط تعديل MQAM عبر قناة خفوت Rayleigh. وتناقش اختيار مخطّط التّعديل، والتي تحافظ على معدّل خطأ الإطار المناسب FER والحد الأقصى من الإنتاجيّة، وفقاً لحالات القناة.
- عملت [9] على تصميم نموذج ماركوف ذي الحالة المنتهية في الوصلة الهابطة لـ LTE وعمدت إلى تحديد عتبات واضحة لاستطاعة الإشارة المستقبلة والعتبات المستخدمة في النّموذج بناء على نسبة الإشارة إلى الضجيج وذلك من أجل معدل خطأ بت مستهدف $10^{-3}$ و $10^{-6}$ ولكن في هذه الدراسة تم العمل على قناة خفوت رايلي فكان النّموذج المقترح فعالاً من أجل سرعات تصل إلى 45km/h.

فكان بحثنا على نموذج ماركوف مشابها لـ [9] من حيث الظروف البيئيّة المحيطة والآلية المتّبعة في تنفيذ الانتقالات، لكننا اعتمدنا عدد مختلف من الحالات مع استهداف معدّل خطأ بت $10^{-6}$ فقط، واعتماد المعيار TS 38.214 المعتد في الجيل الخامس 5G بدلا من المعيار 802.16e في الجيل الرابع، كما استخدمنا ترميز فحص التّكافؤ منخفض الكثافة "Low Density Parity Check" (LDPC) المستخدم في الجيل الخامس بدلا من ترميز توربو (Turbo code)، فحقّقت [9] فعاليّة طيفية تصل لـ 5.5547 bit/sec/Hz أما دراستنا توصّلت إلى مخطّطات تعديل أعلى ترتيباً فحصلنا على فعاليّة طيفية تصل إلى 7.406 bit/sec/Hz.

## 2. أهميّة البحث وأهدافه:

يعد الاستثمار الفعّال لموارد أنظمة الاتصال اللاسلكية أمر بالغ الأهمية، ولاسيما عرض حزمة الارسال حتى ضمن ظروف القناة الخافتة والضّجيجيه. ويهدف البحث إلى:

- ✓ التغلّب على مشكلة CSI غير المحدّثة أو القديمة نتيجة التأخير الزمني، وذلك باستخدام نماذج سلاسل ماركوف ذات الحالة المنتهية FSMC للتنبؤ بحالة القناة التالية.
- ✓ اختيار مخطّطات تعديل ومعدّلات ترميز مناسبة لحالة القناة مع مراعاة معدّل خطأ بت BER مستهدف بهدف زيادة الفعاليّة الطّيفية.
- ✓ تحقيق استقراريه للنظام بحيث لا يضطر إلى تغيير حالته (مخطّط التّعديل ومعدل التّرميز) في كل عملية تحديث الحالة (حسب مؤشر جودة القناة CQI).
- ✓ الحفاظ استمرارية وجودة الاتصال حتى الوصول إلى عتبة الانقطاع.

## 3. طرائق البحث ومواده:

### 1.3. سلسلة ماركوف ذات الحالة المحدودة (FSMC) للقناة الراديوية:

من أجل خفوت رايلي وبفرض S = S0, S1, S2, ... , Sn، تشير إلى مجموعة محدودة من حالات ماركوف الثابتة {Sn}، حيث n = 0, 1, 2...، وتمثل الحالات حيّزات منفصلة غير متداخلة من غلاف الإشارة المستقبلة، وكون عملية ماركوف المحدودة تتمتع بخاصية انتقالات الحالة الثابتة، يكون احتمال الانتقال من حالة لأخرى مستقلًا عن مؤشر الزمن n، ونعبر عنه بالعلاقة (3.1) [10].

$$p_{j.k} = \Pr\left(S_{n+1} = s_k \middle| S_n = s_j\right) \qquad (3.1)$$

من أجل n= 0 , 1 , 2 , . . . , K و $j \in \{0.1.2.\ldots.K-1\}$.

باستخدام هذا التعريف، يمكننا تحديد مصفوفة احتمال الانتقال P وذلك ل K x K حالة بعناصرها $p_{j.k}$ كونها مستقلة عن مؤشر الزمن n، تكون مجموع العناصر في كل صف من مصفوفة احتمال انتقال الحالة يساوي 1 كما في العلاقة (3.2)[10] :

$$\sum_{l=0}^{K-1} p_{j.l} = 1. \forall k \in \{0.1.2.\ldots.K-1\} \qquad (3.2)$$

يُطلق على احتمال البقاء في الحالة k في أي مؤشر زمني ممكن n خاصية الانتقال الثابت (الحالة المستقرة) ويمكن تحديدها بالعلاقة (3.3) [10]:

$$\pi_k = \Pr\ (S_n = s_k) \qquad (3.3)$$

يتم التعبير عن حالة التّوازن التي تتطلب تدفّقا واردًا متساويًا إلى sk والتدفّق الخارج منها، وذلك وفق العلاقة (3.4) [10]:

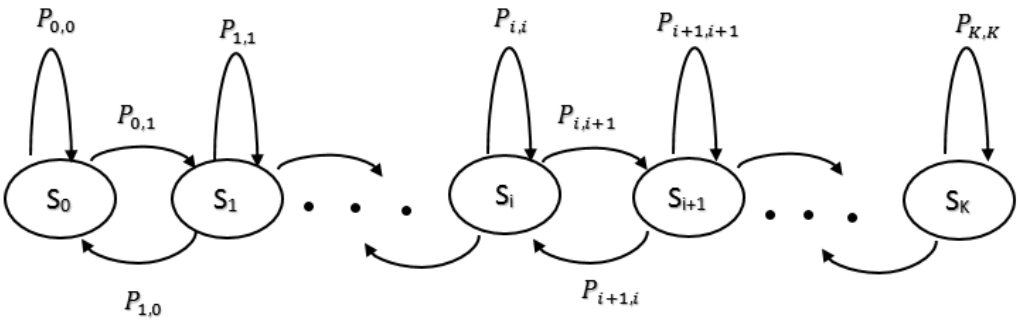
$$\sum_{j=0}^{K-1} \pi_j . p_{j.k} = \sum_{l=0}^{K-1} \pi_k . p_{k.l} = \pi_k \qquad (3.4)$$

أو في شكل مصفوفة $\pi^t P = \pi^t$

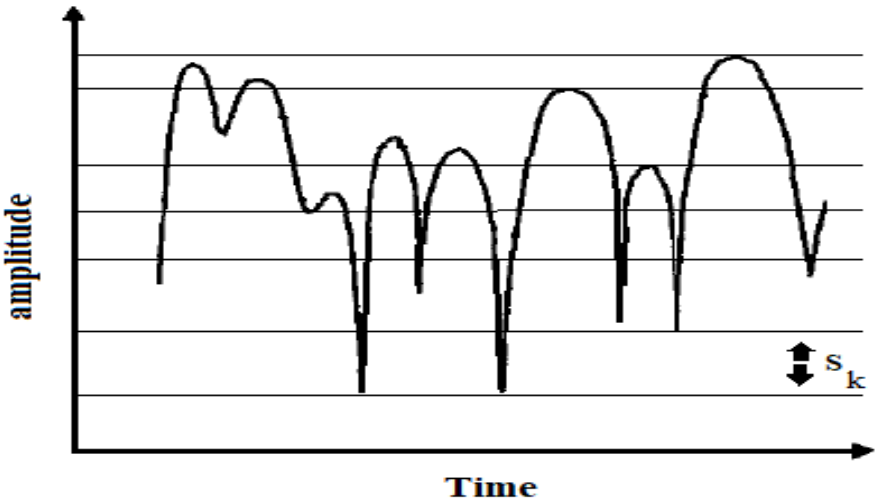
حيث T هي مصفوفة احتمال انتقال الحالة KxK مع عناصرها $p_{j.k}$ و $\pi$ هي متجه احتمال الحالة المستقرة مع العناصر $\pi_k$ و $\pi^t$ هو منقول (transpose) $\pi$.

بتقسيم نطاق نسبة الإشارة إلى الضّجيج (SNR) المستقبلة إلى عدد محدود من مناطق الخفوت وفق مطال غلاف الإشارة، يمكن إنشاء نموذج قناة ماركوف ذي الحالة المحدودة لقناة رايلي اللاسلكية الخافتة، ويقال أن القناة في الحالة $s_k$ إذا كانت SNR المستقبلة لها قيمة بين عتبتي $[\gamma_k، \gamma_{k+1}]$، وتم توضيح الآلية في الشكل (2).

نفترض أيضاً أنه لا يوجد انتقال للحالة خلال الحيز الزّمني لـ slot $(T_s)$، وأن الانتقال بين الحالات يحدث بين الحالات المجاورة، يوضّح الشّكل (1) نموذج FSMC مع احتمال انتقال الحالة بين الحالات المجاورة:




**شكل (1): نموذج FSMC يوضّح احتمالات انتقال الحالة لعدد k من الحالات.**




**الشكل (2): تقسيم غلاف الإشارة إلى عتبات وفق مطال الإشارة.**

بشكل عام يتم حساب معدل الخطأ للإشارة المستقبلة على أنه النّسبة بين عدد البتّات الخاطئة إلى العدد الكلي للبتّات المرسلة وذلك وفق المعادلة [1] (3.5):

$$BER = \frac{Number\ of\ Error\ Bits}{Number\ of\ Transmitted\ Bits} \qquad (3.5)$$

### 2.3. مخطّط تكييف الاستطاعة وفعاليّة الطّيف:

بالنّسبة للحالات المستخدمة $j = 1.2.3 \ldots . n$، نستخدم نهجاً مشابهاً للموجود في [1] لتطبيق التحكم في الاستطاعة على SNR اللحظية $\gamma$، والحصول على معدّل BER مستهدف معيّن لجميع الحالات. ويمكن زيادة الكفاءة الطّيفية من أجل خفوت معيّن مع التّوزيع p (γ) عن طريق تعظيم $E\left[log_2 M(\gamma)\right]$مع مراعاة متوسط قيود الاستطاعة، $E\left[S\left(\gamma\right)\right] \leq \bar{S}$.

يستخدم تخصيص الاستطاعة "water-filling" الذي يزيد من $E\left[log_2 M(\gamma)\right]$ في [11,17] بالعلاقة (3.6):

$$\frac{S_j(\gamma)}{\bar{S}} = \begin{cases} (M_j - 1)\dfrac{1}{1+\beta_j(M)\gamma} & M_j \leq \dfrac{\gamma}{\gamma_\beta} \leq M_{j+1} \\ 0 \quad (no\ power) & M_j = 0 \end{cases} \qquad (3.6)$$

$\beta_j(M)$: ربح التّرميز لحالة التّعديل $M_j$.

عند بعض القيم المنخفضة لـ SNR تكون القناة ضجيجيةً ويتم تحديد قيمة حدية لنسبة الإشارة إلى الضجيج $\gamma_\beta()$ بحيث لا يتم تخصيص أي استطاعة للإرسال عند القيم الأقل منها. ويتم زيادة معدّل التّعديل من خلال تكييف الاستطاعة في (3.6) يعطى بالعلاقة (3.7):

$$M(\gamma) = \frac{\gamma}{\gamma_\beta} \qquad (3.7)$$

من أجل 15 حالة مستخدمة نحدد رتبة التّعديل $(M_j)$:

$$M_j = \begin{cases} 4 & j = 1.2.3 \\ 16 & j = 4.5.6 \\ 64 & j = 7.8.9.10 \\ 256 & j = 11.12.13.14.15 \end{cases} \qquad (3.8)$$

وبالتّالي، بالنّسبة لكل قيمة من قيمة SNR $(\gamma)$، ستحدد خوارزمية AMC أي M-QAM ومعدّل التّرميز، وما هي استطاعة الإرسال المرتبطة التي يجب استخدامها. وبالتّالي، فإن متوسط الكفاءة الطّيفية $(\eta)$ لنظام ذو N حالة يعطى بالعلاقة (3.9) [6,7]:

$$\eta = \frac{C}{B} = \sum_{j=1}^{N} \log_2(M_j) \, . \, p(M_j \le \frac{\gamma}{\gamma_\beta} \le M_{j+1}) \qquad (3.9)$$

يمكن بعد ذلك إيجاد $\gamma_\beta$ من خلال تعظيم (3.9) الخاضعة لقيود الاستطاعة.

$$\sum_{j=1}^{N} \frac{M_j - 1}{\beta_j \bar{\gamma}} \left[ E_1(aM_j) - E_1(aM_{j+1}) \right] = 1 \qquad (3.10)$$

حيث: $a = \frac{\gamma_\beta}{\bar{\gamma}}$ ، $M_j$ رتبة التّعديل ، $E_1(.)$ هو التكامل الأسي.

يتم حساب قيمة $\gamma_\beta$ العددية بحل المعادلة (3.9). ومن أجل N=15 و $\bar{\gamma} = 15$ عندها يكون:

$$a = 0.00534 \Rightarrow \gamma_\beta = a.\bar{\gamma} = \mathbf{0.0801}$$

يتم حساب SNR (dB) من قيمة Eb/N0 (dB) في حالة الإشارة المعدلة والمرمزه وفق العلاقة (3.11)

$$SNR(dB) = \frac{E_b}{N_0} + 10\log(k) + 10\log(R) \qquad (3.11)$$

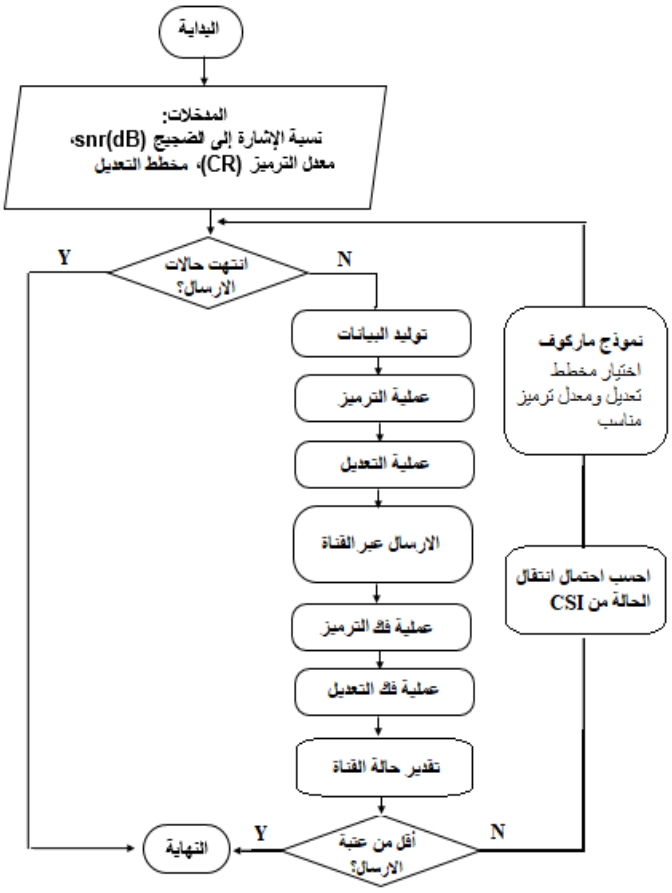
حيث K: عدد البتّات المرسلة في الرمز، R: معدل التّرميز المستخدم.

## 4. النتائج والمناقشة:

يعدّ استغلال الطّيف بفعاليّة أمر بالغ الأهمية، لكن يجب استلام البيانات بأقل خطأ ممكن، لذلك لا بد من استخدام مخطّطات تعديل قوية، ومعدّلات ترميز أعلى، بالرّغم أنها لا تستثمر عرض الحزمة بشكل جيد، لأن عدد بتات المعلومات المرسلة تكون أقل، ويزداد عدد البتّات المستخدمة للتصحيح [9]، وتم توضيح آلية عمل النموذج كما في الشّكل (3). حيث استخدمت البيئة البرمجية MATLAB 2019a لإجراء المحاكاة.

### 1.4. معدّل خطأ البت:

تمّ حساب معدّل خطأ البت لكلّ أنظمة التّعديل والتّرميز المقترحة، وذلك من أجل تدفّق (2) مليون بت مع اعتماد البارامترات لكلّ مخطّط تعديل مع التّرميزات المتاحة التي يدعمها معيار TS-38.214 والمذكورة في الجدول (1)، ولكنّ لم نشمل جميع المخطّطات ضمن الدراسة، لأن التّحسين التي تحدثه ضئيل، واستخدامها سيزيد من تعقيد النّموذج الرّياضي، وتمّت الإشارة إلى نسبة الإشارة إلى الضّجيج الحدّية (عتبة الارسال) $\gamma_\beta$ التي تم حسابها بالعلاقة (3.9) حيث لا يخصّص لها طاقة إرسال وتم البدء من معدّل التّرميز 0.43848 الذي أعطى معدّل خطأ مقبول عند القيمة الحدّية، وكذلك ترميز 0.58789 من أجل مخطّط تعديل QPSK.

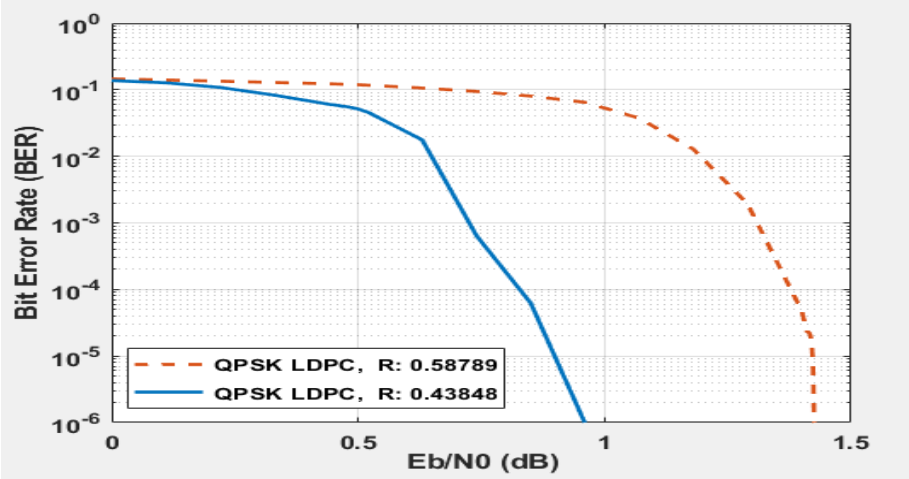



**الشّكل (3) مخطّط صندوقي يوضّح آلية عمل النّظام**

**الجدول (1) بارامترات المستخدمة في المحاكاة**

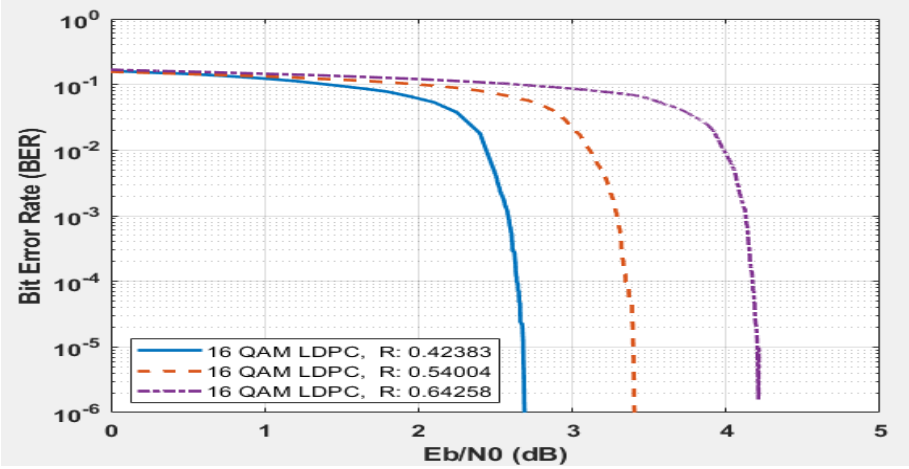
| البارامتر | القيمة |
|---|---|
| مخطّطات التّعديل Modulation Scheme | QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM |
| معدّلات التّرميز code rates | [0.3008, 0.5879, 0.4238, 0.54, 0.6426, 0.5441, 0.5537, 0.6504, 0.7539, 0.8525, 0.6943, 0.7783, 0.8643, 0.895, 0.9258] |
| تكوين الهوائيّ Antenna Configuration | Single Input Single Output (SISO) |
| نوع القناة Channel Type | AWGN, Rayleigh |
| عدد كتل الموارد Recourse Blokes | 50 |
| Duplexing Scheme | TDD |
| معدّل خطأ البت الهدف Target BER | $10^{-6}$ |
| عدد البتّات المرسلة Bit stream | $2x10^{6}$ |
| FTT Sizes | 2048 |
| زمن الإطار Frame Period | 10ms |

يوضّح الشّكل (4) معدّل خطأ البت بالنّسبة لطاقة البت إلى كثافة استطاعة الضّجيج $(E_b/N_0)$ المستخدمة مع مخطّط تعديل QPSK وذلك من أجل كل معدل ترميز، يحقّق معدّل 0.43848 أقل معدّل خطأ بت (يصل إلى $10^{-6}$ عند 0.95dB تقريباً)، وذلك لأنه يرسل بتات تصحيح خطأ بشكل أكبر من بتات المعلومات، فيتم ارسال 0.877bit في الرمز كمعلومات (الرمز في QPSK يحوي 2bit) والباقي 1.123bit إضافية لتصحيح الخطأ، وبالتالي احتمال حدوث الخطأ سيكون قليل. يليه معدّل 0.58789 الذي يرسل 1.17588bit كمعلومات وبالتالي احتمال الخطأ سيزداد بزيادة المعلومات المرسلة.



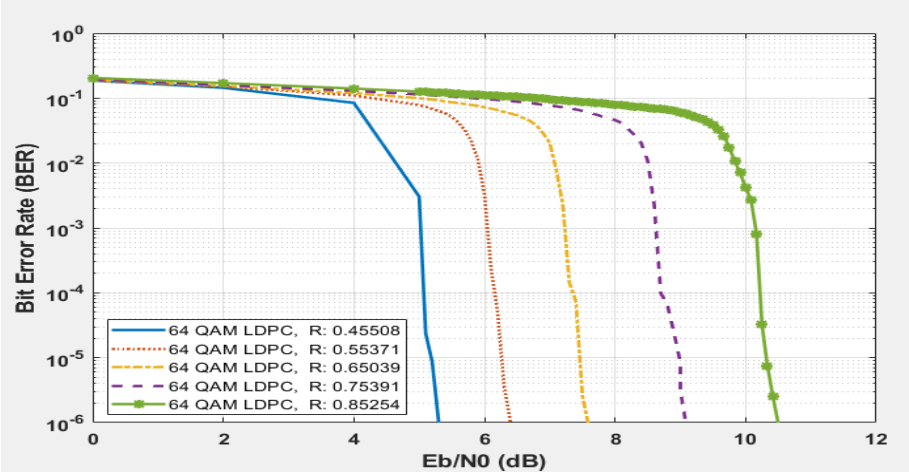

**الشّكل (4) معدّل خطأ البت لتعديل QPSK مع معدّلات ترميز المختلفة**

نوضح في الشكل (5) معدل خطأ البت لمعدلات ترميز مختلفة وهي 0.4238، 0.54، 0.6426 وذلك من أجل مخطّط تعديل 16-QAM وبالمقارنة مع الشّكل السابق (4) أصبحت نسبة الخطأ أكبر منها في QPSK.



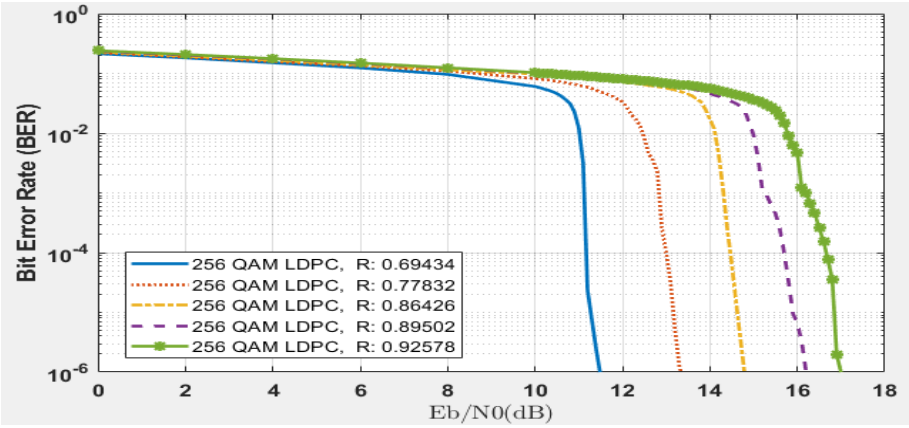

**الشّكل (5) معدّل خطأ البت لتعديل 16-QAM مع معدّلات ترميز المختلفة**

يظهر الشّكل (6) معدّل خطأ البت لمخطّط تعديل 64-QAM مع معدّلات التّرميز (0.4551، 0.5537، 0.6504، 0.7539، 0.8525)، فحقّق معدل التّرميز 0.8525 أعل معدل للخطأ بين المخطّطات التي تستخدم نفس النوع من التّعديل ولكنه حقّق فعاليّة في استغلال الطيف تصل إلى 5.115 bit/sec/Hz.




**الشّكل (6) معدّل خطأ البت لتعديل 64-QAM مع معدّلات ترميز المختلفة**

استخدام ترميز 256-QAM مع معدلات التّرميز (0.6943، 0.7783، 0.8643، 0.8950، 0.9258) كما هو موضح في الشكل (7) فكان هذا المخطّط مع معدّل ترميز 0.9258 قد حقّق أعلى فعاليّة طيفية بين المخطّطات السّابقة، حيث يمكنه ارسال (7.4064 bit per Symbol)، وهو قريب جدا من مطال شانون (8 bit per Symbol) ولكنه يمتلك أكبر معدّل خطأ، لذا سيتم استخدامه عند ظروف إشارة جيّدة (قيمة SNR كبيرة).




**الشّكل (7) معدّل خطأ البت لتعديل 256−QAM مع معدّلات ترميز المختلفة**

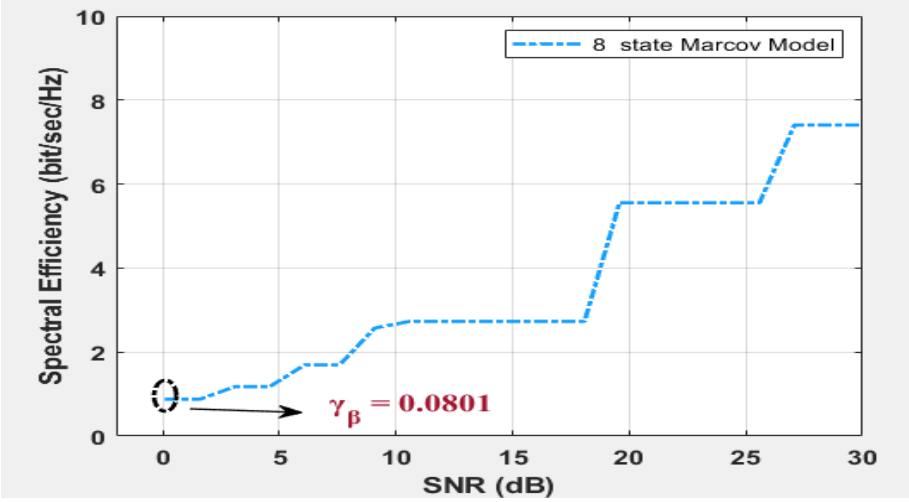
### 2.4. فعاليّة الطّيف:

تعبر فعاليّة الطّيف عن معدّل المعلومات المفيدة التي يمكن استقبالها دون بتات المستخدمة لتصحيح الخطأ، وتعطى بالعلاقة (3.9)، هدف دراستنا هو الحصول على أعلى فعاليّة طيفية ممكنة بأقل زمن معالجة، فتم اعتماد تقنية AMC وعملية الاختيار تتم بالاعتماد على مخطّط (FSMC)، حيث تقابل كل حالة قيمة لنسبة الإشارة إلى الضّجيج المقابلة لمعدّل خطأ المستهدف $10^{-6}$، وكل قيمة لـ SNR تفرض مخطّط تعديل ومعدّل ترميز مختلف، ونوضح العتبات التي تم اعتمادها في الجدول (3)، وتمت دراسة هذه الحالات في الفقرة السّابقة. تم تصميم ثلاث سيناريوهات تختلف عن بعضها بعدد الحالات المكوّنة للنموذج، وسنعمد إلى مناقشه هذه الحالات وتحليل منحني الفعاليّة الطّيفية الناتج عن كل منها.

**السّيناريو الأول:**

في هذا السّيناريو تم إنشاء نموذج ماركوف مكوّن من 8 حالات مذكورة في الجدول (2) وكل حالة تمثل قيمة SNR وهي عتبات تقابل كل منها مخطّط تعديل ومعدّل ترميز مناسب، تم حساب العتبات من مخطّطات BER وذلك بعد تحويلها $E_b/N_0$ إلى SNR بالعلاقة (3.11). نحصل على قيم SNR من معلومات حالة القناة CSI التي تصل من المُستقبل بتغذية عكسيّة بشكل دوري كل 5m.s وعند وصول المعلومات [6]. يقوم نموذج ماركوف بتغيير حالته أو يبقى في الحالة نفسها بحيث يحقّق أعلى فعاليّة ممكنه للطّيف مع الحفاظ على معدّل خطأ بت هدف ( BER target) هو $10^{-6}$.

يوضّح الشّكل (8) فعاليّة الطّيف المقدّرة بـ bit/s/Hz و SNR مقدّرة بالديسيبل، وقيمة القطع $\gamma_\beta$ وهي قيمة حدّية لقوة الإشارة (تم حسابها عددياً من المعادلة (3.9)).




**الشّكل (8) فعاليّة الطّيف الناتجة عن استخدام نموذج ماركوف ذو 8 حالات مع معدّل خطأ بت $10^{-6}$**

**جدول (2) مخطّطات التّعديل ومعدّلات التّرميز وعتبات SNR لثمانية حالات.**

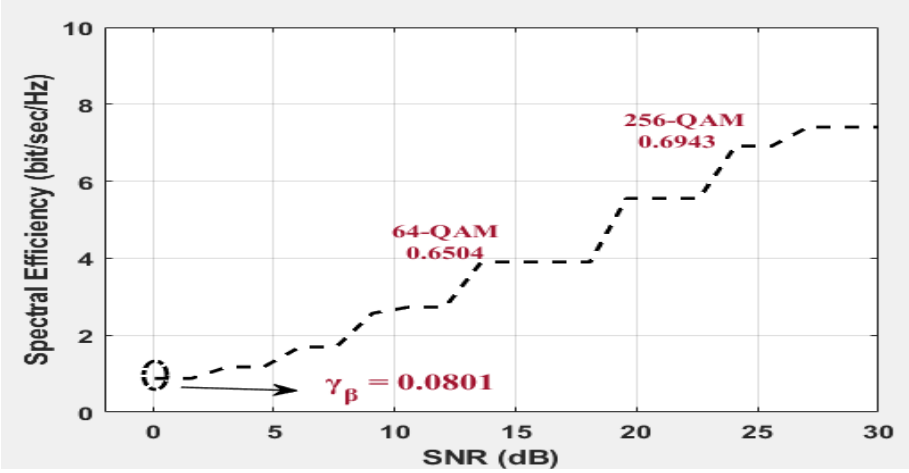
| الحالة | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| مخطّط التّعديل | - | QPSK | QPSK | 16-QAM | 16-QAM | 64-QAM | 64-QAM | 256-QAM | 256-QAM |
| معدل التّرميز | – | 0.4385 | 0.5879 | 0.4238 | 0.61126 | 0.4551 | 0.8525 | 0.6943 | 0.9258 |
| فعالية الطيف | – | 0.877 | 1.1758 | 1.6952 | 2.5704 | 2.7306 | 5.115 | 5.5544 | 7.406 |

**السّيناريو الثّاني:**

تم بناء نموذج ماركوف مكوّن من 10 حالات (عتبات نسبة الإشارة إلى الضّجيج) الشّكل (9)، حيث تم اعتماد مخطّطات التّعديل ومعدّلات التّرميز المستخدمة في السّيناريو الأوّل وإضافة عتبتين اضافيتين:

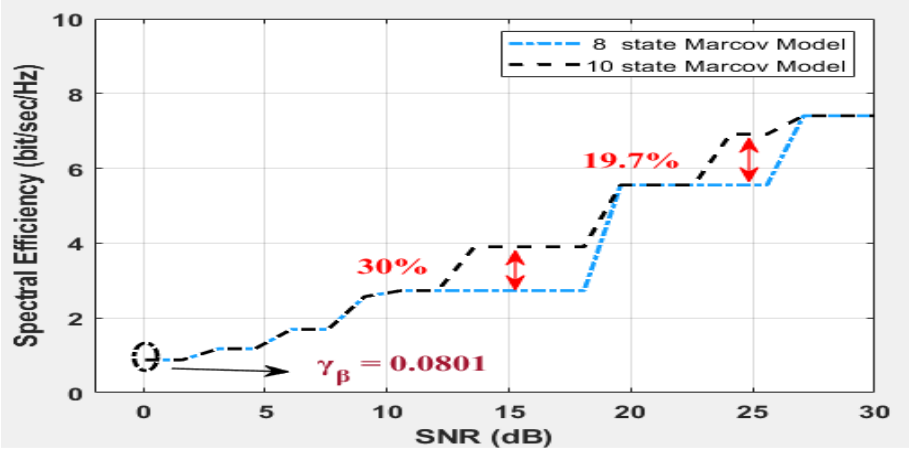
- عند 13.4989 dB وذلك من أجل مخطّط تعديل 64-QAM ومعدل ترميز 0.6504.
- عند 23.1862 dB وذلك من أجل مخطّط تعديل 256-QAM ومعدل ترميز 0.8643.

يبين الشّكل (9) فعاليّة الطّيف من أجل معدّل خطأ مساو لـ$10^{-6}$ فتتزايد هذه الفعاليّة بزيادة قوة الإشارة ووضّحنا على الشّكل القيمة الحدّية لـ SNR، والعتبات التي تمت إضافتها إلى النّموذج السّابق.




**الشّكل (9) فعاليّة الطّيف الناتجة عن استخدام نموذج ماركوف ذو 10حالات مع معدّل خطأ بت $10^{-6}$.**

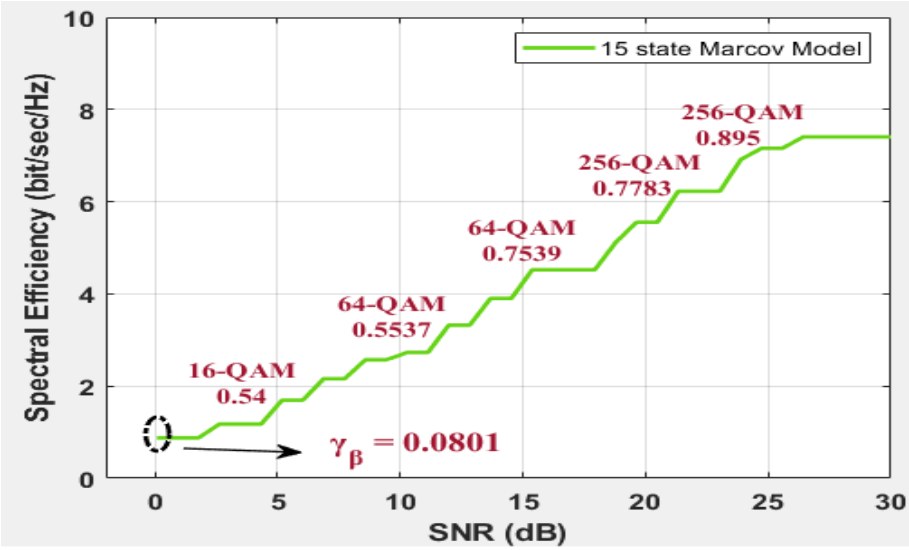
يظهر الشّكل (10) مقارنة بين فعاليّة الطيف في السّيناريو الأول والثّاني حيث أن الفرق بين العتبات في الحالة الثّانية أصبح أقل وبالتّالي لن يتم التقليل من قيمة الإشارة إلى حد كبير، وعند تنفيذ نموذج ماركوف ذو الـ 10 حالات وصل التحسين في فعاليّة الطّيف إلى 30% عند نسبة إشارة إلى الضجيج 19.7 dB، وإلى 8% عند 22.6 dB.




**الشّكل (10): مقارنة فعاليّة الطّيف الناتجة عن استخدام نموذج ماركوف ذو 8 حالات و 10 حالات.**

**السّيناريو الثّالث:**

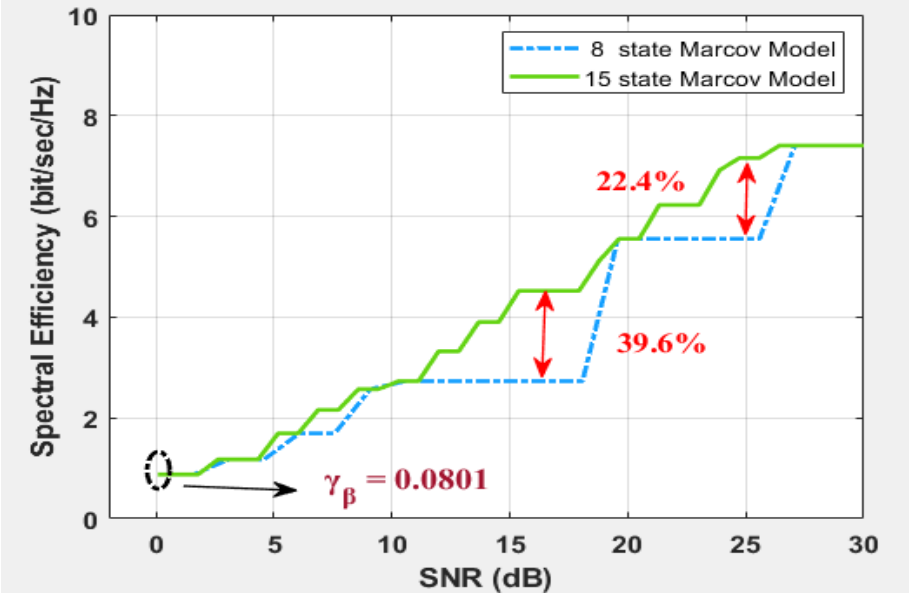
تم تشكيل نموذج ماركوف من 15 حالة وتم اعتماد الحالات من السّيناريو السابق مع إضافة خمس حالات لتصبح الحالات كما في الجدول (3)، والحالات المستخدمة هي الحالات التي يسمح بها المعيار TS_38.214 الموضّحة في [3].




**الشّكل (11) فعاليّة الطّيف الناتجة عن استخدام نموذج ماركوف ذو 15 حالات مع معدّل خطأ بت 6-10**

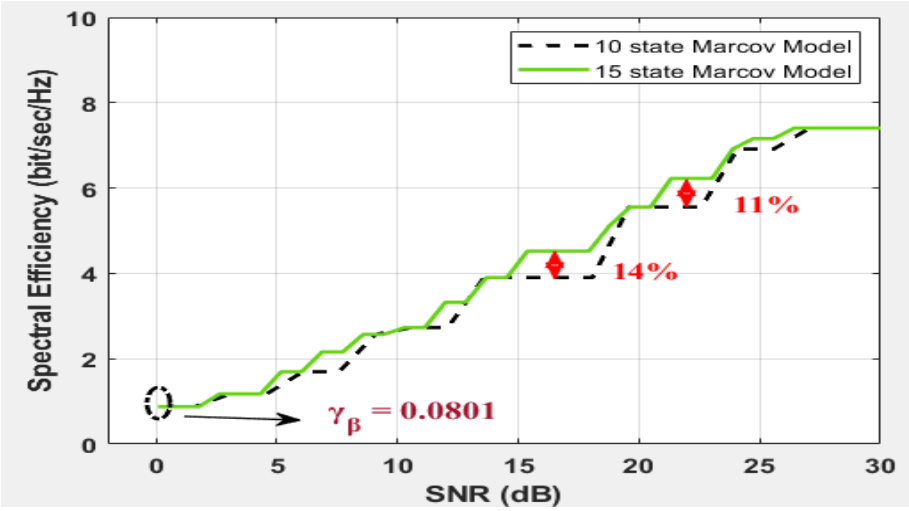
يوضّح الشّكل (11) فعاليّة الطّيف لنموذج 15 حالة، حيث العتبات أصبحت أصغر، وازدادت التّغيرات في المنحني، كما حددنا القيمة الحدّية لنسبة الإشارة إلى الضّجيج التي لا يمكن الارسال دونها، والعتبات المضافة إلى النّموذج السّابق.

يبين الشكل (12) مقارنة بين السّيناريو الأول والثّالث، فيكون التّحسين الكبير نسبياً في فعاليّة الطيف ويصل إلى 39.6% عند نسبة إشارة إلى الضجيج 16.5dB، وتحسين بنسبة 22.4% عند 25dB، قمنا بتثبيت النسب على الشكل مع تحديد عتبة الانقطاع.




**الشّكل (12): مقارنة فعاليّة الطّيف الناتجة عن استخدام نموذج ماركوف ذو 8 حالات و 15 حالات**

بالمقارنة بين السّيناريو الثّاني والثّالث في الشّكل (13)، كان نموذج ماركوف ذو 15 حالة متفوقاً على النّموذج ذو العشر حالات، وذلك بتحسين في الفعاليّة الطيفية يصل إلى 14% عند 16 dB، و11% عند 22.6 dB.




**الشّكل (13): مقارنة فعاليّة الطّيف الناتجة عن استخدام نموذج ماركوف ذو 10 حالات و 15 حالات**

**جدول (3) مخطّطات التّعديل ومعدّلات التّرميز وعتبات SNR.**

| الحالة | مخطّط التّعديل | معدّل التّرميز | العتبة SNR(dB) |
|---|---|---|---|
| 0 | - | - | 0.0801< |
| 1 | QPSK | 0.4385 | 0.1 |
| 2 | QPSK | 0.5879 | 2.1287 |
| 3 | 16-QAM | 0.4238 | 4.9819 |
| 4 | 16-QAM | 0.54004 | 6.7489 |
| 5 | 16-QAM | 0.61126 | 8.3101 |
| 6 | 64-QAM | 0.4551 | 9.6618 |
| 7 | 64-QAM | 0.5537 | 11.6139 |
| 8 | 64-QAM | 0.6504 | 13.4989 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 14.7423 | 0.7539 | 64-QAM | 9 |
| 18.3814 | 0.8525 | 64-QAM | 10 |
| 18.9317 | 0.6943 | 256-QAM | 11 |
| 21.2872 | 0.7783 | 256-QAM | 12 |
| 23.1862 | 0.8643 | 256-QAM | 13 |
| 24.5974 | 0.8950 | 256-QAM | 14 |
| 25.69 | 0.9258 | 256-QAM | 15 |

## ٦. الاستنتاجات والتوصيات:

❖ حقّق نموذج ماركوف ذو 15 حالة في السّيناريو الثّالث أفضل استغلال للطيف بين النّماذج السّابقة حيث سمح بالانتقال الديناميكي بين العتبات بما يتناسب مع حالة القناة، فحقّق تحسيناً يصل إلى 39.6% مقارنة مع النّموذج ذو 8 حالات وتحسيناً يصل إلى 14% بالمقارنة مع النّموذج ذو الـ 10 حالات.

❖ بالرّغم من التّحسين الذي حقّقه النّموذج في السّيناريو الثّالث، فقد تميز بتعقيد حسابي أكبر من النّماذج الأخرى، لكن يمكن التّغاضي عن هذا مقابل الاستغلال الفعّال للطيف الذي يحدثه هذا النّموذج.

❖ حقّق نموذج ماركوف ذو 10 حالات تحسيناً في الفعاليّة الطيفية وصل إلى 30% مقارنة مع نموذج الحالات الثمانية في السّيناريو الأول، وكان ذو تعقيد حسابي مقبول مقارنة بالنّموذج ذو 15 حالة في السّيناريو الثّالث.

❖ تميّز النّموذج في السّيناريو الأول بتعقيد حسابي منخفض وسرعة في اختيار مخطّط التّعديل ومعدل التّرميز، ولكنه بالمقابل قلّل من تقدير حالة القناة حيث أضطر إلى البقاء في حاله أقل فاعليّة رغم تحسن ظروف القناة، وهذا يؤدّي إلى تقليل إنتاجيّة الوصلة بشكل عام. وهذا الأمر ينطبق على النّموذج ذو الحالات العشر، ونلاحظ ذلك في قيم التّحسين عند العتبات التي تمت إضافتها.

❖ النّموذج المقترح توصل إلى نتائج جيدة، ولكنه فعّال بالنّسبة إلى سرعات محددة تصل إلى 45km فقط وهذا جانب مهم للدّراسة والتّحسين، ولم يأخذ النّموذج المقترح بالحسبان التّأخير في وصول معلومات حالة القناة إلى المرسل، وهذا أيضاً أحد المواضيع المهمّة التي يجب التّطرق إليها. وبشكل عام النّموذج المقترح يتفوّق على الطّرق المتّبعة سابقاً في المحاكاة، لكن الكلام الفصل سيكون بالتّطبيق التّجريبي.

**المراجع:**

[1]Dahlman, E.; Parkvall, S. and Sköld, J. (2016) *4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G*. Elsevier Ltd. Amsterdam.

[٢] هيثم الرضوان.(2016). *"تأثير التّعديل المتكيف على معدل الإرسال في شبكات الاتصال النقالة"*. جامعة تشرين.

[٣] رهف ابراهيم ابراهيم. *"تحسين فعاليّة الطّيف بالاختيار المناسب لمخطّط التّعديل ومعدل التّرميز"*. سلسلة العلوم الهندسية مجلة جامعة طرطوس المجلد (الرابع) العدد (التاسع) لعام 2020.

[4] Cianca, E.; Luise, A. Ruggieri, M. and Prasad, R. *Channel-Adaptive Techniques In Wireless Communications: An Overview*. Commun. Mob. Comput. John Wiley & Sons, Ltd. 2002; 2:799–813.

[5] Kwan, R. and Leung, C. (2005) *An HMM Approach to Adaptive Modulation and Coding with Multicodes for Fading Channels*. IEEE CCECE/CCGEI, Saskatoon.

[6] Vu, X.; Nguyen, D. and Vu, T.A. *A Finite-State Markov Channel Model for AMC scheme in WiMAX*. (Submitted for publication in February 2009).

http://researchgate.net/publication/224107096_An_finitestate_Markov_channel_model_for_ACM_scheme_in_WiMAX.

[7]Nguyen, D. T.; Vu, X. T. and Tuan, N. Q. (May 2009) An FSMC Model for the ACM Scheme with Repetition Coding in Mobile WiMAX. International Conference on Advanced Technologies for Communications.

[8] Elnawaa, K. (2017) *Performance Evaluation for Adaptive Modulation Wireless System over Rayleigh Fading Channel Using Finite State Markov Chain (FSMC) Technique*. University of Victoria.

[٩] رهف ابراهيم ابراهيم. (2022). *"تحسين فعاليّة الطيف للوصلة الهابطة في شبكات الجيل الرابع 4G "*. جامعة طرطوس.

[10] Wang, H. S. and Moayeri, N. (February 1995) "Finite-state Markov channel—A useful model for radio communication channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 44, pp. 163–171.